能源发展趋势与能源科技发展方向的几点思考

金之钧[1,2,3*]　白振瑞[3]　杨 雷[1]

1 北京大学 能源研究院 北京 100871
2 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室 北京 100083
3 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院 北京 100083

摘要　能源科技的发展将深刻地影响着未来能源格局，因此能源发展前景预测对国家政策制定和企业战略谋划都意义重大。文章在对能源现状与发展趋势分析的基础上，总结了能源转型多元化、低碳化、分散化、数字化和全球化的“五化”特征，指出了2016年以来出现的中美经贸摩擦、低油价和人工智能技术应用等方面的新变化特征，并就能源领域未来科技发展趋势提出了低成本技术、信息技术和颠覆性技术3个方面的思考，以期为我国积极应对能源转型，布局未来能源科技提供点滴参考。

关键词　能源转型，技术为王，低成本技术，信息技术，颠覆性技术

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20200509002

现代社会，能源、粮食和水是人类赖以生存的三大必需品。能源关乎人类社会的全面发展，与国内生产总值（GDP）息息相关[1]（图1）。

能源发展前景预测对国家政策制定和企业战略谋划都意义重大。能源科技的发展将深刻地影响未来能源格局，“科技决定能源的未来，科技创造未来的能源”[2]。为此，各国十分重视能源科技的发展，并制定能源战略计划，如美国的《全面能源战略》、欧盟的《2050能源技术路线图》、日本的《面向2030年能源环境创新战略》等。

我国《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》提出，到2030年，建成与国情相适应的完善的能源技术创新体系，能源技术水平整体达到国际先进水平，以支撑我国能源产业与生态环境协调可持续发展，以及进入世界能源技术强国行列的奋斗目标。该计划部署了15个重点领域，分别是：煤炭无害化开采技术，非常规油气和深层、深海油气开发技术，煤炭清洁高效利用技术，二氧化碳捕集、利用与封存

*通讯作者
资助项目：中国科学院学部咨询项目（KKBE170026）
修改稿收到日期：2020年5月9日

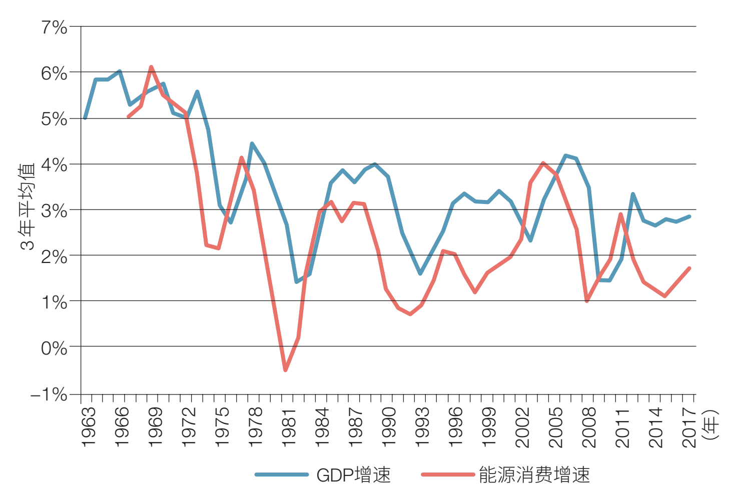


图 1 1963—2017 年世界 GDP 增速与能源消费增速的关系
数据来自《BP 世界能源统计 2018》及世界银行，GDP 以 2010 年美元计[1]

技术，先进核能技术，乏燃料后处理与高放废物安全处理处置技术，高效太阳能利用技术，大型风电技术，氢能与燃料电池技术，生物质、海洋、地热能利用技术，高效燃气轮机技术，先进储能技术，现代电网关键技术、能源互联网技术，以及节能与能效提升技术，从而对我国能源技术体系未来发展做了全面论述。

中国工程院于2015年启动了“我国能源技术革命体系战略研究”重大咨询项目[3]，从核能、风能、太阳能、储能、油气、煤炭、水能、生物质能、智能电网与能源网融合等九大能源技术领域开展研究，制定了前瞻性技术（2020 年）、创新性技术（2030 年）和颠覆性技术（2050 年）三阶段发展的能源技术路线。

近年来，随着资源与环境的双重约束，以及能源科技进步，新能源成本快速降低，能源清洁低碳加速转型已成为全球发展趋势。能源转型不仅伴随着产业结构调整，同时也是能源科技进步的重要驱动力，科技进步与能源转型相互促进，正在深刻改变能源发展的前景。

本文是笔者在近 2 年参加科学技术部、国家能源局、国家自然科学基金委员会“十四五”规划及面向 2035 年的战略研究过程中，基于对当前能源现状与发展趋势的分析，对能源领域未来科技发展趋势所做的 3 个方面思考与判断，以期为我国积极应对能源转型，布局未来能源科技提供点滴参考。

1 能源现状与发展趋势

1.1 现状

2019 年，全球能源消费总量达到了 138.62 亿吨油当量；其中，石油 44.7 亿吨油当量，煤炭 38.3 亿吨油当量，天然气 34.3 亿吨油当量，化石能源总的占比为 84.62%[4]，比 2010 年降低了 2 个百分点。同时，天然气长足发展，2019 年消费量是 1965 年的 6.35 倍，占比从 15% 增长到 24.7%。更加清洁的天然气替代了大量石油和煤炭。

1.2 发展趋势

对于未来能源发展趋势，我们重点分析了自 2016 年以来的“变”与“不变”，在“不变”中坚守，在“变”中调整。

近 10 年来，全球能源发展的主要趋势没有改变。 ① 对于未来能源需求增长，世界上很多知名研究机构都进行过预测（图 2）：可再生能源和天然气将成为满足未来全球能源需求增长的主要来源，“低碳化”和“多元化”是未来能源发展的重要趋势与特征。随着太阳能、风能、地热能、海洋能及储能等新能源快速发展，能源正从过去以煤炭、油气、电力集中式资源供给，向集中式与“分散式”并重发展。② 随着各种信息化技术在能源领域中的应用，特别是“数字化”技术逐步打破了不同能源品种间的壁垒，也成为未来的一大发展趋势。在能源界，“没有哪个国家能够在能源问题上独善其身”“技术没有国界”已经成为大家的共识。③ 全球能源互联网概念的提出与全球能源互联网发展合作组织的成立是能源“国际化”的一个重要标志。美国著名学者杰里米·里夫金在其著作《第三次工业革命》[5]中，首先提出了能源互联网的愿景，引发了国内外的广泛关注。2015 年 9 月 26 日，

国家主席习近平在联合国发展峰会上发表重要讲话，倡议探讨构建全球能源互联网，推动以清洁和绿色的方式满足全球电力需求，这是对传统能源发展观的历史超越和重大创新。能源科技国际合作越来越广泛，强度越来越大，投资 100 亿美元的国际热核聚变实验堆合作项目（ITER），就是一个典型案例。低碳化、多元化、分散化、数字化和全球化将是未来能源发展的主要方向。

*在充分认识这些“不变”特征的同时，识别变化的特征与发展趋势，是问题的关键。*① 自 2018 年以来，美国把中国确定为竞争对手，特朗普政府挑起了中美经贸摩擦。继后，美国国内要求与中国科技脱钩甚至是全面脱钩的呼声甚嚣尘上，这是包括能源科技领域在内的中国科技面临的重大挑战。我们要去掉幻想，早做准备，坚持以我为主和开放合作的方针，加大自主研发力度。② 新冠肺炎疫情和石油价格战的影响叠加，极大地打压了石油价格。2020 年 3—4 月国际油价一路下跌，4 月 20 日，美国西德克萨斯轻质中间基原油（WTI）期货价格更是跌至 –37.3 美元/桶，开历史先河！今后一个时期，油价低于 60 美元/桶是大概率事件。③ 人工智能、区块链等技术突飞猛进，将深刻地影响未来能源的发展，在某种程度上将改变能源格局与业态。颠覆性技术始终伴随着人类科技进步史，具有不可预见属性。只有准确把握这些发展趋势，才有可能对未来能源科技发展趋势做出较为准确判断。

2 低成本技术将是企业的核心竞争力

1967 年，美国石油地质学家 Hubbert[6]建立了用于预测油田累计产量和最终可采储量的“钟形”模型。此后，石油峰值论一度盛行，石油资源稀缺性被过度强调。在这样的背景下，获取更多油气储量成为绝大多数石油公司尤其是国际大石油公司的重要战略目标之一，那是一个“资源为王”的时代。

*美国“页岩革命”的成功，消除了人们对油气资源稀缺性的担心。*据美国能源信息署（EIA）的评价结果，全球石油和天然气技术可采资源总量分别多达 33 570 亿桶和 648 万亿立方米[7]，油气资源不再稀缺。此外，由于太阳能、风能的利用，能源变得可再生，取之不尽，用之不竭。谁拥有技术，谁就拥有能源资源，这是一个“技术为王”的时代。

*在“技术为王”的时代，获取能源资源的成本或效率是决定成败之关键所在，因此发展低成本技术是未来重要趋势。*近年来，可再生能源的快速发展就得

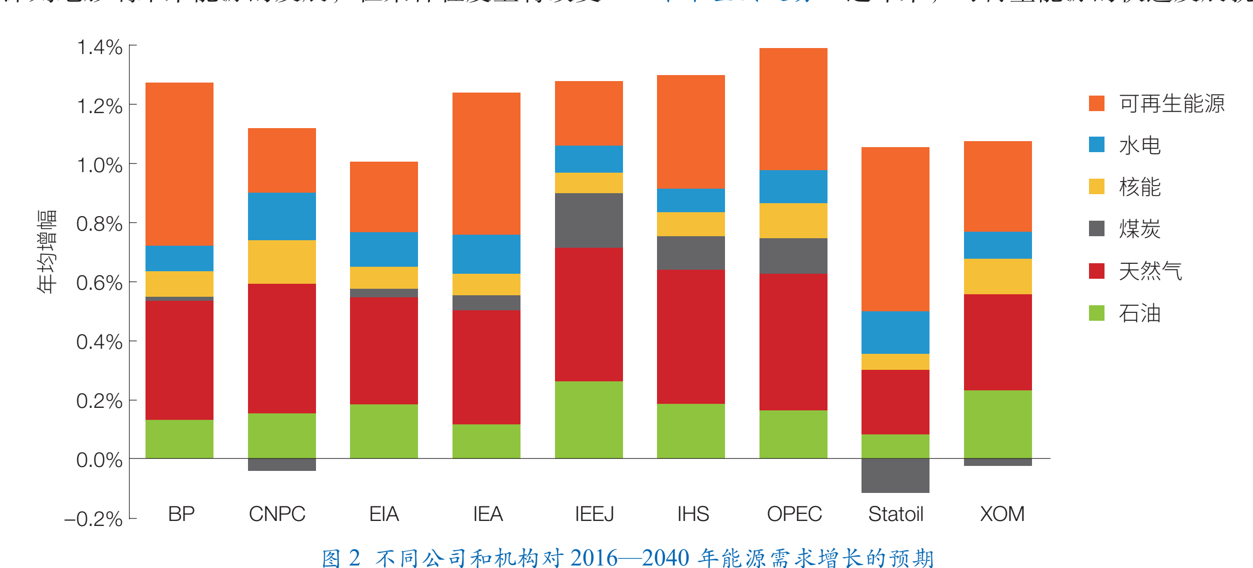


图 2 不同公司和机构对 2016—2040 年能源需求增长的预期

BP，英国石油公司；CNPC，中国石油天然气集团有限公司；EIA，美国能源信息署；IEA，国际能源署；IEEJ，日本能源经济研究所；IHS Markit，埃信华迈公司；OPEC，石油输出国组织；Statoil，挪威国家石油公司；XOM，埃克森-美孚公司

益于其成本的大幅降低。2018年公用事业规模光伏发电的加权平均平准化电力成本（LCOE）相较2010年降低了77%，陆上风电的降幅也有35%[8]。美国能源信息署预测，美国2022年后投产的风电和太阳能发电项目的LCOE都将低于燃气发电[9]。在集中式可再生能源发电大幅降低成本和快速发展的同时，分散式发电的发展也在加速。据光伏协会公布的数据，2018年中国新增分布式光伏装机2 320万千瓦，占比为52.7%，第一次超过了集中式光伏；2019年这种势头继续维持，而且小规模的户用分布式光伏占了将近一半。

低成本可再生能源技术是能源科技发展的重点领域。太阳能和风能是未来可再生能源的主体，而降低成本、提高技术成熟度和构建合适的商业模式是可再生能源未来的发展方向。在风能领域，未来技术发展方向主要有大功率风电机组整机设计、风机运维与故障诊断、大功率无线输电的高空风力发电技术等。在太阳能领域，需要重点发展太阳能光热发电、薄膜电池技术、太阳能制氢技术、可穿戴柔性轻便太阳电池技术等[3]。

油气领域的低成本技术也是能源科技发展关注的焦点。到2050年，油气在一次能源消费结构中占比仍将保持在50%左右，这已成为业界共识。在近期储量增长最快的深水油气领域，浮式天然气生产、处理、液化、储存和卸载一体化平台（FLNG）及海底生产设备的应用，再加上结构的不断优化，生产成本可降至每桶50美元以下。页岩油气是今后增储上产的另一重要领域，2012—2016年美国页岩油开发的平衡油价总体上降低了50%，技术进步贡献了1/3的降幅[10]。

低成本油气技术发展方向很多。① 在地球物理勘探方面，主要包括智能高效采集技术、基于深度学习的地球物理资料自动处理和解释技术，以及物探全过程智能管理技术等。② 在钻完井工程方面，主要包括精确导向的智能自动钻完井技术、钻完井工程地质一体化及井筒完整性技术、智能化压裂装备与技术，以及智能化机器人压裂施工技术等。③ 在油气田生产经营方面，主要包括基于大数据和深度学习的新一代人工智能油田技术、石油工业智能云网平台技术，以及人工智能机器人技术等。

3 信息技术将重塑能源未来

当前，世界正在经历第四次工业革命，信息技术日新月异，大数据、人工智能、区块链等技术快速发展。这些新兴科学技术为能源行业的发展创造了机遇，它们与能源行业的深度融合是获取低成本技术的重要途径。低成本技术将改变世界能源的发展格局，进而重塑未来的能源行业[11]。

能源行业是最早得益于数字化的行业。电厂、煤矿和油气田很早就已开始应用计算机等信息技术来提高自动化和管理的水平，现在更提出了数字电厂、数字矿山、数字油田、数字炼厂等概念，这些极大地提高了劳动生产率，降低了人工成本。当前及今后一个时期，是从数字化到智能化的时代。智能电厂、矿山、油田和炼厂，将进一步优化生产流程，精简机构和人员——工厂“无人化管理”是基本模式，这将极大地改变行业生态。

信息技术正在从更广和更深的层次对能源体系进行重构。从生产端到消费端，数字化将系统地改变能源的整个产业链和生态体系，使整个产业链的每个环节都有机地结合起来，从而极大地提高能源利用效率。华为、阿里巴巴、腾讯、谷歌、特斯拉等新兴的技术公司都纷纷在能源领域开展业务——通过大数据、人工智能等手段，提高整个系统的灵活性，从而极大地提高能效，进而改变整个行业的产业链结构和商业模式[12]。

区块链技术将为能源行业注入新动力。区块链技术在能源领域已经被愈加广泛地应用，在以原油为代表的能源交易平台、可再生电力的点对点交易、电动汽车充电、电网资产管理、绿证追踪管理甚至虚拟能

源货币等领域都已崭露头角，这将会给能源领域带来更深刻的变化。

数字化转型将重塑油气行业。新一代人工智能技术在石油工业上游的全面集成创新应用，将产生新一代人工智能油田技术，实现对油气行业传统流程的升级优化和组织再造，大幅度降低油气行业成本，增强企业竞争力和油气行业持续生存的能力。

4 颠覆性技术是未来能源最大变数

能源科技是当今科技创新最主要和最活跃的领域之一。在油气、氢能、储能、核聚变能等方面都有可能出现颠覆性新技术，不论哪一种颠覆性技术出现，都会极大地改变世界能源供需格局。

4.1 油气领域的颠覆性技术

水平井多段清水压裂技术将使页岩油气实现经济有效的开采。这一颠覆性技术会极大地改变全球能源格局。应用物理与化学相结合的方法，对低成熟度页岩油、稠油进行原位改质，这有可能是继“页岩革命”之后的另一次革命。一旦这一颠覆性技术取得成功，又一巨大油气资源将得以经济、有效的开发和利用。纳米技术和新材料也有可能催生出颠覆性的油气提高采收率技术，如地下纳米机器人驱油和地下油水分离技术等。多用途激光工具与钻井技术结合，或许可以颠覆传统的钻井方式，即由激光熔融替代机械破岩，提高钻井效率。

4.2 氢能源技术

氢能源技术在能源领域产生颠覆性影响的关键在于低成本、高性能的氢燃料电池技术和低成本、高效率的工业化制氢技术。近年来，世界各国都已认识到氢能作为二次能源在能源转型中的重要性，很多国家都高度重视氢能源产业的发展，把氢能源产业提升到国家能源战略的高度，制定氢能发展战略，并出台促进其发展的扶持政策[13]。一旦借助石墨烯、纳米超材料等新材料的电解制氢技术取得重大突破，氢燃料大规模甚至完全替代化石燃料将是有可能的。随着新材料聚合物电解质膜燃料电池技术的成熟和相关基础设施的完善，以氢能为动力的汽车、火车和轮船等将替代燃油机动车成为主要的交通工具。欧洲已经开展不少天然气管道掺输氢气的试验项目，以期为氢产业大规模发展做好准备[14]。

4.3 储能技术

储能技术被称为“能源革命的支撑技术”，在很多方面都将发挥重大的作用。① 对于电力系统而言，储能可为电网提供调峰调频、削峰填谷、黑启动、需求响应支撑等多种服务，提升传统电力系统的灵活性、经济性和安全性。② 在可再生能源开发方面，储能可显著提高风电和太阳能发电的消纳水平，支撑分布式电力及微网。随着分布式光伏、小型生物质能源、天然气冷-热-电三联供、燃料电池等分布式能源技术的日益成熟，以及相关的储能、数字化等技术的进展，分布式能源未来还将获得更加迅猛的发展。③ 在交通方面，储能将在能源互联互通、融合新能源汽车在内的智慧交通网络方面起到关键作用。有可能为能源行业带来颠覆性影响的是基于新材料的新型电池储能技术，如石墨烯超级电容器、碳纳米材料自储能器件、超导电磁储能技术等。如果低成本高效率的储能技术出现并投入大规模商业化应用，将极大地促进可再生能源的发展，使新能源交通工具大规模甚至完全替代燃油交通工具。

4.4 可控核聚变技术

核聚变能是人类理想中的终极能源，具有诸多优势。可控核聚变的主流技术方案主要有 2 种，即磁约束核聚变（MFC）和惯性约束核聚变（IFC）。目前，世界上的核聚变相关研究计划比较多，如国际热核聚变实验堆（ITER）计划、美国国家点火装置（NIF）、美国悬浮偶极子试验装置（LDX）、美国 Z-IFE 装置、美国 Lawrenceville Plasma Physics 研究项目、美国 FRX-L 研究项目、加拿大通用聚

变、欧洲高功率激光能源研究（HiPER）计划和德国 Wendelstein 7-X 等。中国于 2007 年正式加入 ITER 计划，同时也在大力推动国内的核聚变科学技术研究。我国已圆满完成了聚变工程实验堆（CFETR）概念设计，目前正在开展工程设计。中国环流器二号 A装置（HL-2A）和全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST）等大科学装置也先后建成，多项物理实验研究成果居于世界前列。HL-2A 在国内首次实现了偏滤器位形放电、高约束模式运行。2017 年 7 月，EAST 在世界上首次实现了 5 000 万度等离子体持续放电 101.2 秒的高约束运行，再次创造了磁约束核聚变研究新的世界纪录[15]。

5 结论

随着减排和环境保护形势的日益严峻，在新能源和智能化等技术进步和成本快速下降的推动下，全球能源沿着多元化、低碳化、分散化、数字化和全球化的方向加速转型，正在进入一个能源转型发展的时代。同时，中美经贸摩擦、沙俄油价战、新冠肺炎疫情等使能源未来发展充满不确定性。新的能源技术和新的商业模式将改变传统的能源供应模式，综合能源服务会逐步成为主流。新能源和天然气等清洁能源将满足未来大部分新增的能源需求，能源体系也将发生结构性的变化。低成本技术将成为未来能源科技发展的主流，人工智能等信息技术将重塑能源未来。未来在油气、氢能、储能、核聚变能等领域都有可能出现颠覆性新技术，从而根本性地改变未来能源的图景。准确把握能源技术发展趋势，对于指导科技创新的方向，以及国家制定能源政策和企业战略转型都具有重要意义。

参考文献

1 Tverberg G. Low Oil Prices: An Indication of Major Problems Ahead? [2018-11-28]. https://ourfiniteworld.com/2018/11/28/low-oil-prices-an-indication-of-major-problems-ahead/.

2 国家发展改革委, 国家能源局. 能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）. [2016-06-01]. http://www.nea.gov.cn/2016-06/01/c_135404377.htm.

3 李立浧, 饶宏, 许爱东, 等. 我国能源技术革命体系战略研究. 中国工程科学, 2018, 20(3): 1-8.

4 中国石油经济技术研究院. 2019中石油经研院能源数据统计. 北京: 中国石油经济技术研究院, 2020.

5 Rifkin J. The Third Industrial Revolution. New York: Palgrave Macmillan, 2011.

6 Hubbert M K. Degree of advancement of petroleum exploration in the United States. AAPG Bulletin, 1967, 51(11): 2207-2227.

7 EIA. Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries outside the United States. [2013-06-13]. https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/archive/2013/pdf/fullreport_2013.pdf.

8 IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2018. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2019.

9 EIA. 2020. Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the *Annual Energy Outlook 2020*. [2020-05-06]. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/electricity_generation.pdf.

10 Nysveen P M. Global oil market trend. [2016-09-28]. https://www.eia.gov/finance/markets/reports_presentations/2016PerMagnusNysveen.pdf.

11 IEA. Digitalization and Energy. Paris: OECD/IEA, 2017.

12 杨雷. 能源的未来——数字化与金融重塑. 北京: 石油工业出版社, 2020.

13 IEA. The Future of Hydrogen. Paris: OECD/IEA, 2019.

14 Alvera M. Generation H–Healing the Climate with Hydrogen. Milan: Mondadori, Italy, 2019.

15 中国国际核聚变能源计划执行中心. “人造太阳”计划: 和平利用聚变能. 国际人才交流, 2019, (9): 8-10.

Thinking on General Trends of Energy Development and Directions of Energy Science and Technology

JIN Zhijun[1,2,3*] BAI Zhenrui[3] YANG Lei[1]

(1 Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China;

2 State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;

3 SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract The development of energy science and technology has profound impacts on the future energy pattern, and the outlook of energy development is of great significance to national policy-making and corporate strategic planning. Based on the analysis of the current situation and development trend of energy sector, this study summarizes the five characteristics of energy transformation: diversification, decarbonization, decentralization, digitalization, and globalization, and points out three new features in respect of the trade war between China and US, low oil price, and application of artificial intelligence technology that emerged since 2016. A few thoughts concerning low-cost technology, information technology, and subversive technology are presented for analyzing the development trend of science and technology in energy sector, actively responding to energy transformation and formulating development strategy of energy science and technology.

Keywords energy transformation, technology being king, low-cost technology, information technology (IT), subversive technology



金之钧 中国科学院院士。北京大学能源研究院教授，中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院教授。兼任页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室主任、国家能源页岩油研发中心主任、中国石油学会副理事长。曾担任中国石油大学（北京）副校长，中国石油化工股份有限公司副总地质师和石油勘探开发研究院院长。长期从事石油地质理论研究和能源战略研究，获国家技术发明奖二等奖、国家科技进步奖二等奖2项、李四光地质科学奖、孙越崎能源科学技术奖和归国留学人员成就奖，出版专著15部，发表论文400余篇。E-mail: jinzj57@pku.edu.cn; jinzj.syky@sinopec.com

JIN Zhijun Member of Chinese Academy of Sciences. He is Professor of Institute of Energy, Peking University, and the Professor of SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute. He is also the Director of State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, the Director of China State Energy Center for Shale Oil Research and Development, and the Vice President of the Council of Chinese Petroleum Society. He was the former Vice President of China University of Petroleum (Beijing), the Deputy Chief Geologist of SINOPEC, and the President of SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute. He has long been engaged in research on petroleum geology and energy strategy. He has received one second-class award of China State Technological Invention Award, two second-class awards of National Science and Technology Progress Award, Li Siguang Geological Science Award, Sun Yueqi Energy Award, and Returned Overseas Scholars Achievement Award. He has co-authored over 400 papers and 15 books. E-mail: jinzj57@pku.edu.cn; jinzj.syky@sinopec.com

■责任编辑：岳凌生

* Corresponding author